

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2002-57396  
(P2002-57396A)

(43) 公開日 平成14年2月22日 (2002.2.22)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームト* (参考)
H 0 1 S	3/17	H 0 1 S	5 F 0 7 2
	3/06		B
	3/10		Z

審査請求 未請求 請求項の数25 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2000-399523 (P2000-399523)

(22) 出願日 平成12年12月27日 (2000.12.27)

(31) 優先権主張番号 2 0 0 0 - 4 4 2 3 3

(32) 優先日 平成12年7月31日 (2000.7.31)

(33) 優先権主張国 韓国 (K R)

(71) 出願人 596180076

韓国電子通信研究院

Electronics and Tel  
ecommunications Res  
earch Institute

大韓民国大田廣域市儒城區柯亭洞161

(72) 発明者 チェ ヨンキュ

大韓民国 デジョンシ ユシヨング シン  
ソンドン ハナ アパートメント, 110  
-409

(74) 代理人 100077481

弁理士 谷 義一 (外2名)

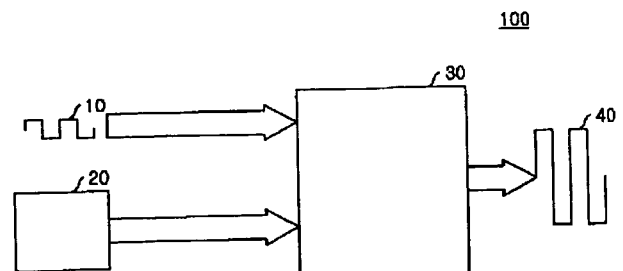
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光増幅器および光利得媒質

(57) 【要約】

【課題】 1600～1650nm波長帯域の増幅器に適用できる光増幅システムを提供する。

【解決手段】 光信号を増幅するための光増幅器において、光信号に対する利得媒質に使用するために、プラセオジウム ( $\text{Pr}^{3+}$ ) イオンが添加された低ホノンエネルギー光学媒質と、1600～1700nm帯域内の増幅された光信号を得るために、低ホノンエネルギー光学媒質を励起させるための励起手段とを備えた。



## 1

## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光信号に対する利得媒質として使用するためにプラセオジム ( $\text{Pr}^{3+}$ ) イオンが添加された低ホノンエネルギー光学媒質と、

該低ホノンエネルギー光学媒質を励起させ、1600～1700 nm 帯域内の増幅された光信号を得る励起手段とを備えたことを特徴とする光信号を増幅するための光増幅器。

【請求項 2】 前記低ホノンエネルギー光学媒質は、代表的なホノンエネルギー値が  $320\text{cm}^{-1}$  以下であることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 3】 前記低ホノンエネルギー光学媒質は、セレニドガラスであることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 4】 前記セレニドガラスは、プラセオジムイオンの溶解度を向上させるためにガリウムイオン ( $\text{Ga}^{3+}$ ) を含むことを特徴とする請求項 3 に記載の光増幅器。

【請求項 5】 前記低ホノンエネルギー光学媒質は、テルル系ガラスであることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 6】 前記低ホノンエネルギー光学媒質は、単結晶形態であることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 7】 前記低ホノンエネルギー光学媒質は、非晶質形態であることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 8】 前記プラセオジムイオンの量は、0.1 モル% 以下であることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 9】 エルビウムイオン ( $\text{Er}^{3+}$ ) が感光剤として前記低ホノンエネルギー光学媒質に添加されることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 10】 前記エルビウムイオンの添加量は、1 モル% 以下であることを特徴とする請求項 9 に記載の光増幅器。

【請求項 11】 前記励起手段は、1450～1500nm または 1900～2100nm 波長帯域を有する励起光源を発生させることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 12】 前記励起手段における励起準位は、 $\text{Pr}^{3+}:(^3\text{F}_3, ^3\text{F}_4)$  または  $\text{Pr}^{3+}:(^3\text{F}_2, ^3\text{H}_6)$  であることを特徴とする請求項 11 に記載の光増幅器。

【請求項 13】 前記プラセオジムイオンと前記エルビウムイオンとが互いにエネルギー共鳴状態であることを特徴とする請求項 9 に記載の光増幅器。

【請求項 14】 前記低ホノンエネルギー光学媒質は、光ファイバの形態であることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

【請求項 15】 前記低ホノンエネルギー光学媒質は、平板導波路の形態であることを特徴とする請求項 1 に記載の光増幅器。

## 2

【請求項 16】 低ホノンエネルギー物質と、

前記低ホノンエネルギー物質に添加されるプラセオジムイオンとを備えたことを特徴とする光利得媒質。

【請求項 17】 前記低ホノンエネルギー物質は、低ホノンエネルギーガラスであることを特徴とする請求項 16 に記載の光利得媒質。

【請求項 18】 前記低ホノンエネルギー物質は、代表的なホノンエネルギー値が  $320\text{cm}^{-1}$  以下であることを特徴とする請求項 16 に記載の光利得媒質。

10 【請求項 19】 前記プラセオジムイオンの量は、0.1 モル% 以下であることを特徴とする請求項 16 に記載の光利得媒質。

【請求項 20】 エルビウムイオンが感光剤として前記低ホノンエネルギー光学媒質に添加されることを特徴とする請求項 16 に記載の光利得媒質。

【請求項 21】 前記エルビウムイオンの添加量は、1 モル% 以下であることを特徴とする請求項 20 に記載の光利得媒質。

20 【請求項 22】 前記低ホノンエネルギー物質は、非晶質形態であることを特徴とする請求項 16 に記載の光利得媒質。

【請求項 23】 前記低ホノンエネルギー物質は、セレニドガラスであることを特徴とする請求項 16 に記載の光利得媒質。

【請求項 24】 前記セレニドガラスは、プラセオジムイオンの溶解度を向上させるためにガリウムイオンを含むことを特徴とする請求項 23 に記載の光利得媒質。

【請求項 25】 前記低ホノンエネルギー物質は、テルル系ガラスであることを特徴とする請求項 16 に記載の光利得媒質。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光増幅器および光利得媒質に関し、より詳細には、光波長が 1600～1650nm 帯域の信号光を増幅するための光増幅器および光利得媒質に関する。

【0002】

【従来の技術】 周知のように、光通信における伝送容量の画期的な向上のために導入された波長分割多重伝送において、チャネルの間隔を小さくすることは、非線型効果によって伝送品質を低下させることとなる。したがって、伝送容量を大きくするためには、信号光の波長範囲を広くすることが好ましい。通常、光伝送に用いられるシリカ光ファイバの低損失波長領域は、およそ 1200～1700nm である。したがって、約 500nm に達する広い波長帯域を、実際の光伝送に用いることが可能である。ゆえに、この広い波長帯域で動作可能な光増幅器の開発は、非常に重要なことである。

【0003】

50 【発明が解決しようとする課題】 光伝送用のシリカ光フ

## 3

ファイバの低損失波長領域である1200~1700nmの範囲を全て活用するために、現在、1300nm帯域、1450nm帯域、1530~1600nm帯域、及び1650~1680nm帯域のいずれかで動作するイオン添加光ファイバ増幅器の研究が進められている。しかしながら、1600~1650nm波長帯域に用いられる光増幅器は、現在のところ開発されていない。

【0004】特に、エルビウム(Er)添加シリカ光ファイバ増幅器の利得帯域は、約1600nmより短い波長に限られる。これは、エルビウムイオンの $4f-4f$ 間の遷移特性に起因するものであり、従来の技術では、1600~1650nm帯域で動作するイオン添加光増幅器は皆無である。

【0005】また、トリウムを添加したフッ化物系光ファイバ増幅器の場合には、利得波長帯域が1650nmより長い。これは、同様にトリウムイオンの遷移特性に起因するものであり、利得帯域を1650nmより短くすることは非常に難しい。

【0006】本発明は、このような問題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、1600~1650nmの波長帯域の増幅器に適用できる光増幅器および光利得媒質を提供することにある。

## 【0007】

【課題を解決するための手段】本発明は、このような目的を達成するために、請求項1に記載の発明は、光信号に対する利得媒質として使用するためにプラセオジム( $\text{Pr}^{3+}$ )イオンが添加された低ホノンエネルギー光学媒質と、該低ホノンエネルギー光学媒質を励起させ、1600~1700nm帯域内の増幅された光信号を得る励起手段とを備えたことを特徴とする。

【0008】請求項16に記載の発明は、低ホノンエネルギー物質と、前記低ホノンエネルギー物質に添加されるプラセオジムイオンとを備えたことを特徴とする。

## 【0009】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳細に説明する。

【0010】図1は、本発明の一実施形態にかかる光増幅器を示した概略図である。光増幅器100は、入力光信号10と励起ソース20を入力とし、増幅された光信号40を出力するプラセオジム( $\text{Pr}^{3+}$ )イオンのような希土類イオンが添加された低ホノンエネルギーガラス30で構成されている。

【0011】このような光増幅器100において、一定波長の光信号10が、低ホノンエネルギーガラス30に入力され、励起ソース20で発生した励起光が低ホノンエネルギーガラス30内のプラセオジムの希土類イオンを励起させることによって、増幅された光信号40が得られる。

【0012】上述した光増幅器100に用いられる光ガラスは、1.6 $\mu\text{m}$ 帯域のプラセオジムイオンの蛍光を使用するためには、ホスト材料の代表的なホノンエネルギーが約320 $\text{cm}^{-1}$ より小さいものが求められる。

## 4

【0013】エルビウム添加シリカ光ファイバ増幅器の場合のように、一般的な光ファイバ増幅器及び平板導波路増幅器は、目的とする波長帯域で蛍光遷移を発生させるために、光ポンピングされた状態で上述した波長帯域の信号光が入射されると、誘導放出現象によって信号光の強さが大きくなる。この場合、信号光の利得に影響を及ぼす因子は、極めて多様であって、基本的に、特定波長で効果的な光増幅を達成するためには、(1)蛍光遷移の波長範囲が信号光の波長帯域にあり、(2)蛍光遷移の誘導放出断面積が大きく、(3)蛍光遷移の転移分配率が大きく、(4)蛍光寿命が長く、(5)ホスト材料が光ファイバ形態や平板導波路形態に容易に成形でき、(6)ホスト材料が熱的、機械的に安定すべきである。

【0014】プラセオジムイオンの $4f-4f$ 遷移の一つである( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) $\rightarrow$  $^6\text{H}_4$ 遷移の中心波長は、約1650nmである。しかし、一般的な光ガラスでは、遷移強度が非常に弱く、測定される蛍光寿命も非常に短い。これは、 $^3\text{F}_3$ 準位と最近接下位準位である $^3\text{F}_2$ 準位とのエネルギー間隔が、約1350 $\text{cm}^{-1}$ と小さいので、多重ホノン緩和(multi-phonon relaxation)現象が極めて大きく発生して、蛍光寿命を短くするためである。多重ホノン緩和率の大きさは、ホスト材料の振動エネルギーに対して指数的に比例する。ここで、( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ )準位の蛍光から、実験的に測定された多重ホノン緩和率の大きさを最もよく説明するホノンエネルギーとして、代表的な振動エネルギーに言及する。すなわち、ホスト材料の振動エネルギーが大きいほど、多重ホノン緩和率も大きくなるのである。一般的に、ガラスの網の目(network)を構成するガラス形成イオンと関連した振動モードが、主に希土類イオンの多重ホノン緩和率に大きい影響を及ぼす。例えば、シリカガラスでSi-O結合の振動エネルギーは、約1100 $\text{cm}^{-1}$ であるため、プラセオジムイオンの1.6 $\mu\text{m}$ 遷移は、シリカガラスで事実上不可能となるのである。

【0015】したがって、プラセオジムイオンから発生する1.6 $\mu\text{m}$ 蛍光の強度を向上させるためには、ホノンエネルギーが小さいガラスを、ホスト材料に使用することが要求される。従来の光増幅器に用いられるホスト材料には、アルミノシリケート(alumino-silicate)、酸化テルル系ガラス(tellurite)、重金属フッ化物系ガラス、硫化物系ガラスなどがあり、各々のホノンエネルギーは、各々1100 $\text{cm}^{-1}$ 、700 $\text{cm}^{-1}$ 、500 $\text{cm}^{-1}$ 、350 $\text{cm}^{-1}$ である。

【0016】上述したフッ化物系ガラス、硫化物系ガラス及びセレンド(selenide)ガラスの遷移特性は、表1にさらに詳細に説明されている。すなわち、フッ化物系及び硫化物系ガラスでの1.3 $\mu\text{m}$ 蛍光遷移 $\text{Pr}^{3+} : ^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$ と、本発明のホスト材料に用いられたセレンドガラスでの1.6 $\mu\text{m}$ 蛍光遷移( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) $\rightarrow$  $^3\text{H}_4$ との特性値を示

す。ここで、表1に示したフッ化物系ガラスと硫化物系ガラスの特性値は、D. R. Simons et al., "Pr<sup>3+</sup>-Doped GeSx-Based Glasses for Fiber Amplifiers at 1.3 μm" Opt. Lett., vol. 20, no. 5, pp. 468-470 (1995)、及び D. W. Hewark et al., "Quantum-Efficiency of Praseodymium Doped Ga:La:S Glass for 1.3 μm Optical Fiber Amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, no. 5, pp. 609-612 (1994)の先行論文に掲載された内容である。

【0017】 (<sup>3</sup>F<sub>3</sub>, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>) 準位の固有の輻射寿命は、密度分布を考慮して測定されるが、測定された寿命と放出断面積とをかけた値は、光ファイバ増幅器の効率を決定する重要な要素となる。表1に示したように、セレニド

ガラス	遷移	ホノンエネルギー (cm <sup>-1</sup> )	算出された蛍光寿命 (μs)	測定された蛍光寿命 (μs)	遷移分配率 (%)	量子効率 (%)	放出断面積と測定された蛍光寿命の積 (10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> s)
フッ化物系	<sup>1</sup> G <sub>4</sub> → <sup>3</sup> H <sub>4</sub>	~500	2484	110	60	4	36
硫化物系	<sup>1</sup> G <sub>4</sub> → <sup>3</sup> H <sub>4</sub>	~350	510	300	52	60	250
セレニド	( <sup>3</sup> F <sub>3</sub> , <sup>3</sup> F <sub>4</sub> ) → <sup>3</sup> H <sub>4</sub>	~200	~320 ± 50	212 ± 10	77	65 ± 20	636 ± 200

【0019】また、プラセオジムイオンの<sup>3</sup>F<sub>3</sub>準位と<sup>3</sup>F<sub>2</sub>準位とのエネルギー間隔が小さいので、硫化物系ガラスを使用しても1.6 μm蛍光の蛍光寿命が非常に短くなる。したがって、1.6 μm帯域増幅器としてプラセオジム添加ガラス素材を利用するためには、ホストガラスの代表的なホノンエネルギーが約320 cm<sup>-1</sup>より小さくすべきである。この条件を満足するようなガラス系の中では、セレニドガラスとテルル系ガラスとが最も好適である。これらのガラスが有する優れたガラス形成能力のためである。セルレナイドガラスは、主なガラス形成イオンがセレンウム (selenium) であって、Ge-As-Se、Ge-Sb-Se、As-Seなどがある。そしてテルル系ガラスは、テルル (tellurium) が主なガラス形成イオンであって、Ge-Se-Te、Ge-As-Se-Teなどがある。またGe-S-I、Ge-Ga-S-Brなどのような低ホノンエネルギーガラスもホスト材料として適用可能である。結論的に、プラセオジムイオンの1.6 μm蛍光を利用するためには、ホスト材料の代表的なホノンエネルギーが320 cm<sup>-1</sup>より小さいものが求められる。

【0020】(実施例1) 第1の発明の実施例では、Ge-As-Se系列のガラスに対していくつかの組別に実験及び分析して、Ge<sub>30</sub>As<sub>6</sub>Ga<sub>2</sub>Se<sub>60</sub>の組成を有するガラスをホスト材料に使用した。まず、プラセオジムイオンの溶解度を調べた結果、1モル%のプラセオジムイオンが添加されても良好なガラス状を形成した。すなわち、Ge-As-Seの3つの成分系のガラスに少量のGaを添加することによって、希土類イオンの溶解度を向上させたものである。

ガラスから測定される寿命と放出断面積の大きさは、硫化物系ガラスのそれより大きい。そして、Pr<sup>3+</sup>:<sup>3</sup>H<sub>4</sub>→<sup>1</sup>G<sub>4</sub>遷移の振動強度 (oscillator strength) は、Pr<sup>3+</sup>:<sup>3</sup>H<sub>4</sub>→(<sup>3</sup>F<sub>3</sub>, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>) 遷移と比較すると、それほど大きくはなく、1.3 μmの蛍光放出は、約1020nm帯域で発生する。また、この波長帯域で使用可能な高電力レーザーダイオードが商業的には開発されていないが、1480nm波長帯域では、使用可能な強くて安定的なレーザーダイオードが開発されており、1.6 μm放出用励起ソースとして効果的に利用することができる。これに対する詳細な説明は後述する。

【0018】

【表1】

【0021】上述したガラス製造について、より詳しく説明すれば、まず純度99.999%以上のGe、Ga、As及びSe粉末を準備し、希土類ソースには、純度99.999%以上の純度を有するプラセオジムとエルビウム金属とを準備する。ここで、1モル%まではプラセオジムがホスト内に溶解されるが、少ない量のガリウム (Ga) をGe-As-Se系に添加することによって、溶解度をさらに向上させることができる。各々の物質を計量し、シリカ容器に仕込んだ後、シリカ容器を密閉して炉 (rocking furnace) 内で熔融させる。温度は、最初は、2℃/minで500℃まで次第に昇温させた後、1000℃までは1℃/minで徐々に昇温させる。1000℃で12時間の間熔融させた後、熔融液が入った容器を炉から取り出して水で急冷させる。次いで、試料をガラス遷移温度 (約360℃) 近くで焼きなましさせた後、測定のために、2mm厚さに薄く切り取った後、艶出しして (polishing) 完成する。

【0022】また、本発明に用いられるセレニドガラスは、優れた熱的安定性を示す。すなわち、転移温度と晶化温度とは、各々約350℃と510℃とで、ガラス棒から光ファイバを延伸することが容易である。実際に、Ge-As-Ga-Se系の相異なる組成を有するガラス棒の延伸工程は、既に実験されたことがあり、このように延伸された光ファイバは、光学性質及び機械的性質に優れた面を示している。

【0023】図2は、1モル%のPrイオンが添加されたセレニドガラスの吸収スペクトルを示した図である。ホストガラスの短波長側の吸収が、約800nmから始まるこ

とが分かる。したがって、約800nmより短い波長でプラセオジムイオンを励起することは、励起光の一部がホスト材料に吸収されるために、励起効率を低下させることになるだけでなく、ホスト材料の変形を引き起こすこととなる。実際に、800nmで、150mW強度でレーザービームを約10分間試片に照射した結果、試片の温度が急激に上昇し、レーザービームが照射された部分の局所的な溶融現象が発見された。

【0024】図3は、プラセオジムイオン ( $\text{Pr}^{3+}$ ) 及びエルビウムイオン ( $\text{Er}^{3+}$ ) のエネルギー準位を示した図である。 $^3\text{F}_3$ と $^3\text{F}_4$ 準位及び $^3\text{F}_2$ と $^3\text{H}_6$ 準位の各々の間隔が狭い方ので、各エネルギー準位の差に応じたボルツマン分布 (Boltzmann distribution) を計算すれば、各々の上位準位である $^3\text{F}_4$ と $^3\text{F}_2$ からの密度は、各々10%と9%程度である。したがって、 $^3\text{F}_3$ — $^3\text{F}_4$ 及び $^3\text{F}_2$ — $^3\text{H}_6$ 準位は、各々 ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) マニホールド (manifold) 及び ( $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{H}_6$ ) マニホールドと見るのが妥当である。 ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) 準位の吸収断面積の最大値は、1590nmでは $2.1 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ であり、1480nmでは $1.2 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ であり、一般的な酸化ガラスでさらに大きい値を示す。一方、各吸収遷移の振動強度を利用してJudd-Ofelt分析を実施してみれば、最適化されたJudd-Ofelt強度因子 (intensity parameter)  $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 及び $\Omega_3$ は、各々 $1.01 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ 、 $10.54 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ 及び $2.53 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ である。ここで、Judd-Ofelt 分析時の典型的な誤差は、約15%程度である。

【0025】図4は、0.05モル% $\text{Pr}^{3+}$ 添加セレンドガラスの蛍光放出スペクトルを示した図である。一般的にエルビウム添加光ファイバ増幅器に用いられる1480nmレーザーダイオードを利用して、光ポンピングして得られた蛍光放出スペクトルが示されている。本実施例で使

したホスト組成から観察された1.6 $\mu\text{m}$ 帯域の蛍光のピーク波長は、約1650nm半波高全幅値 (full width at half maximum) は、約100nmであった。もちろん、ピーク波長は、サンプル組成に応じて多少変わる。

【0026】図5は、セレンドガラス内の $\text{Pr}^{3+}$ 添加濃度に対する ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) 準位の蛍光寿命を示した図である。図5において、1.6 $\mu\text{m}$ 帯域蛍光の蛍光寿命は、プラセオジムイオンの濃度が0.05モル%までは、 $215 \pm 5 \mu\text{s}$ でほとんど一定であり、それ以上の濃度では減少した。Judd-Ofelt分析から計算された輻射遷移確率 (radiative transition probability) と比較して計算した量子効率、 $65 \pm 20\%$ であった。量子効率を計算するときには発生した誤差の大部分は、Judd-Ofelt分析時に発生したものと判断される。また、誘導放出断面積を計算した結果、最大値が $(3 \pm 1) \times 10^{-20} \text{cm}^2$ で極めて大きい値を示した。 ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ )  $\rightarrow$   $^3\text{H}_4$ 遷移の転移分配率は、約77%に計算され、したがって該当準位から発生する輻射遷移の大部分は、1.6 $\mu\text{m}$ 蛍光に集中することが分かる。一方、希土類イオンの濃度が増加しながら発生する蛍光寿命の減少を濃度消光 (concentration quenching) といい、

このような蛍光寿命の減少は、プラセオジムイオン間の非輻射エネルギー伝達に起因する。具体的に、次のような2つのスキームが存在する。すなわち、第1に、 ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) :  $^3\text{H}_5 \rightarrow$  ( $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{H}_6$ ) : ( $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{H}_6$ ) があって、第2に、 ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) :  $^3\text{H}_4 \rightarrow$  ( $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{H}_6$ ) :  $^3\text{H}_5$ がある。このようなイオン間の非輻射エネルギー伝達を最小化するために、本実施例のホスト組成では、プラセオジムイオンの添加量は、最大0.05モル%が好適であることが分かるし、種々の条件に応じてプラセオジムイオンの添加量は、0.1モル%以下が好ましい。

【0027】プラセオジムイオンから発生する1.6 $\mu\text{m}$ 帯域の蛍光を得るための励起波長には、直接励起 (direct pumping)、すなわち $^3\text{H}_4 \rightarrow$  ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) 吸収遷移が表われる波長帯域のうち、短い波長側を使用するのが好ましい。具体的に、既存のエルビウム添加シリカ光ファイバ増幅器を励起する時に用いられる1480nmレーザーダイオードを、そのまま使用することができるという長所がある。もう一つの励起方法としては、 $^3\text{H}_4 \rightarrow$  ( $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{H}_6$ ) 吸収バンドを利用することである。すなわち、約2000nmに該当する波長で励起する場合、 ( $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{H}_6$ ) : ( $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{H}_6$ )  $\rightarrow$  ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) :  $^3\text{H}_5$ に該当するエネルギー伝達が発生し、結果的に密度反転 (population inversion) を得られることとなる。

【0028】(実施例2) 第2の実施例として、1480nm帯域の励起効率を向上させるためのイオン共同添加スキーム (codoping scheme) について説明する。第2の実施例では、既存の1480nmレーザーダイオードをそのまま使用する場合に対して、1.6 $\mu\text{m}$ 帯域蛍光の強度及び見かけ蛍光寿命 (apparent lifetime) の向上を図った。上述したように、1480nm帯域は、現在エルビウム添加増幅器の励起波長に用いられている。したがって、プラセオジムイオンとエルビウムイオンとを共に添加したセレンドガラスを製造した。具体的には、プラセオジムイオンの添加量は、0.05モル%に固定し、エルビウムの添加量を多様に変化させたサンプルを製造した。このようなガラスに、1480nmレーザーダイオードを使用して励起する場合、プラセオジムイオンとエルビウムイオンとが同時に励起される。この場合、各イオンが励起される比率は、該当波長における吸収断面積及び添加濃度に比例することとなる。上述したように、1480nmで、プラセオジムイオンの吸収断面積は、 $1.2 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ であり、エルビウムの吸収断面積を測定した結果、 $1.1 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ であった。したがって、同じ濃度で二つのイオンが添加されたガラスを励起する場合、プラセオジムイオンの励起率 (excitation ratio) がエルビウムイオンのそれより大きくなる。プラセオジムイオンの1.6 $\mu\text{m}$ における蛍光強さを向上させるためには、エルビウムイオンの $^4\text{I}_{13/2}$ 準位に存在する密度が、プラセオジムイオンの ( $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{F}_4$ ) 準位に効率的に移動すべきである。この場合、このようなエネルギー伝達は、2つの形態で発生し得る。第

1 は、輻射エネルギー伝達 (radiative energy transfer) であり、第 2 は、非輻射エネルギー伝達 (nonradiative energy transfer) である。このような二つの形態において、これらエネルギー伝達を励起するために、できるだけドナーの放出スペクトルとアクセプタの吸収スペクトルとが重ねられる。すなわち、エネルギー共鳴 (energy resonance) が大きいほどエネルギー伝達が活発に発生するのである。第 2 の実施例のように、プラセオジムイオンとエルビウムイオンとを共に添加すれば、約 1536nm にピークがある典型的なエルビウムイオンの  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  遷移に起因する蛍光が、エルビウムイオンから発生する。このような蛍光の波長は、プラセオジムイオンの ( $^3F_3$ ,  $^3F_4$ ) 吸収帯と非常によく一致する。それに対し、プラセオジムイオンの放出スペクトルとエルビウムイオンの吸収スペクトルとは、重なる部分が反対の場合より極めて小さい。一方、エネルギー伝達の大きさを決定するもう一つの因子は、エネルギードナーイオンの輻射遷移確率と非輻射遷移率が小さく、測定される蛍光寿命が長いことである。第 2 の実施例で使用したセレニド組成のガラスでエルビウムイオンを単独添加した場合、エルビウムイオンの  $^4I_{13/2}$  準位の蛍光寿命は、3.26ms として、プラセオジムイオンの ( $^3F_3$ ,  $^3F_4$ ) 準位の蛍光寿命より極めて長いということを確認した。結局、二つのイオンを共に添加して 1480nm 帯域に励起する場合、エルビウムイオンからプラセオジムイオンに活発なエネルギー伝達が発生することが分かり、反対に、プラセオジムイオンからエルビウムイオンへのエネルギー伝達は、これに比べて発生し難いであろうとことが理論的に分かる。一方、エルビウムイオンからプラセオジムイオンへのエネルギー伝達は、輻射エネルギー伝達より非輻射エネルギー伝達が優れている。これは、ドナーとアクセプターとの間の距離が小さくなるほど非輻射エネルギー伝達の大きさが輻射エネルギー伝達の大きさより非常に大きくなり、したがって、共に添加された組成物では、一般的に非輻射エネルギー伝達が優れることとなる。

【0029】図 6 は、0.05モル%Pr<sup>3+</sup>と0.2モル%Er<sup>3+</sup>とが共に添加されたガラスの蛍光放出スペクトルを示した図である。エルビウムイオンからプラセオジムイオンへのエネルギー伝達が活発に発生することを示す端的な例として、プラセオジムイオンが単独に添加されたサンプルとエルビウムイオンと共に添加されたサンプルから測定したスペクトルを併せて示した。プラセオジムイオンから発生する 1.6 $\mu$ m 帯域蛍光強度が、エルビウムイオンが添加された場合にさらに向上することを確認し得るし、同時に 1.5 $\mu$ m 帯域でエルビウムイオンから発生する蛍光が表われる。重要なことは、エルビウムイオンの添加量がプラセオジムより非常に大きいにもかかわらず、エルビウムイオンの 1.5 $\mu$ m 帯域蛍光の強度は、プラセオジムイオンの 1.6 $\mu$ m 帯域蛍光に比べて非常に小さいとい

うことである。これは、エネルギー伝達が非常に活発に発生することを示す例である。一方、非輻射エネルギー伝達が発生すれば、ドナーの蛍光寿命は、減少し、アクセプターの蛍光寿命は増加することとなる。

【0030】図 7 は、0.05モル%Pr<sup>3+</sup>単独添加ガラス及び 0.05モル%Pr<sup>3+</sup>/0.5モル%Er<sup>3+</sup>が共に添加されたガラスの蛍光減衰曲線を示した図である。プラセオジムイオンの 1.6 $\mu$ m 帯域蛍光の存続時間の増加を示す代表的な例である。ここで、プラセオジムイオン 0.05モル%とエルビウムイオン 0.5モル%とを共に添加した場合は、プラセオジム 0.05モル%を単独に添加した場合より、二倍程度の存続時間の増加があることが分かる。これもまた二つのイオン間のエネルギー伝達が活発に進行していることを示す。エルビウムイオンの蛍光寿命がプラセオジムイオンの蛍光寿命より長いため、プラセオジムイオンの蛍光寿命は、プラセオジムとエルビウムイオンとが共に添加された場合より長くなる。すなわち、励起光が消えても持続的に長い時間にわたってエルビウムイオンからプラセオジムイオンにポピュレーション (population) が供給されるために、プラセオジムイオンの蛍光寿命が長くなるのである。

【0031】図 8 は、Er<sup>3+</sup>添加量による Pr<sup>3+</sup>:1.65 $\mu$ m 蛍光と Er<sup>3+</sup>:1.54 $\mu$ m 蛍光の蛍光寿命を示した図である。0.1モル%のエルビウムが添加されたガラスを例に挙げれば、単独添加の場合、蛍光寿命が 3.26ms でプラセオジムイオンが 0.05モル%導入されれば、約 0.75ms に急激に減少することが分かる。ここで、プラセオジムイオン濃度が 0.05モル%に固定されていても、エルビウムイオンの濃度が増加するにつれて、蛍光寿命は次第に減少することが分かる。結論的に、プラセオジムイオンとエルビウムイオンとを共に添加すれば、1480nm 帯域の励起効率が急激に向上するのである。これは、プラセオジムイオンを多量添加することが好ましくない状況で、1.6 $\mu$ m 帯域蛍光の強度を向上させる極めて効率的な手段である。ただし、エルビウムイオンの最大添加量は、ホスト材料の希土類イオンに対する溶解度と、エルビウムイオンから発生する 1.6 $\mu$ m 帯域での基底状態吸収 (ground state absorption) とによって決定することができし、好ましくは、1モル%以下が好ましい。一方、プラセオジムイオンとエルビウムイオンとが共に添加された場合において、励起波長として 1.5 $\mu$ m 帯域光ファイバレーザのような光源を使用しても、上記 1480nm レーザダイオードを使用した場合と同様の効果を示す。

【0032】(実施例 3) 第 3 の実施例として、プラセオジムイオンを対象にセレニド系列ガラスの溶解度を向上させるために実施された一連の実験結果、熱的安定性に優れて光ファイバ製造が容易な Ge-As-Se の三つの成分系に少量のガリウムを添加すれば、溶解度が向上することを確認した。

【0033】本発明の技術思想は、上述した好ましい実

施例によって具体的に記述されたが、上述した実施例はその説明のためのものであって、その制限のためのものではないことに留意されるべきである。また、本発明の技術分野における通常の専門家であるならば、本発明の技術思想の範囲内で種々の実施例が可能であることを理解されるべきである。

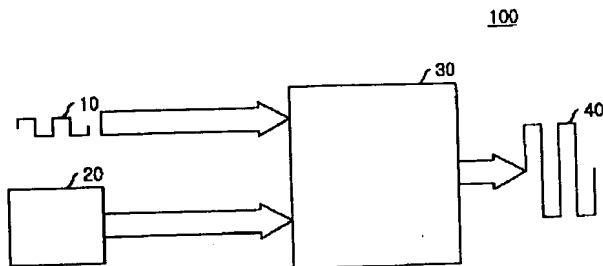
#### 【0034】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、プラセオジムイオンが、代表的なホノンエネルギーが約  $320\text{cm}^{-1}$  より小さいガラスに添加された場合に、 $1.6\mu\text{m}$  帯域の蛍光放出を利用するレーザー及び増幅器に用いることができる。励起波長は、既存の  $1480\text{nm}$  レーザダイオードを使用し得るし、または、 $1550\text{nm}$  帯域のエルビウム添加光ファイバレーザーを使用することもできる。またプラセオジムとエルビウムイオンとを共に添加したガラスで、エルビウムイオンからプラセオジムイオンへのエネルギー伝達が非常に効率的に発生して  $1.6\mu\text{m}$  蛍光の励起効率が向上される。

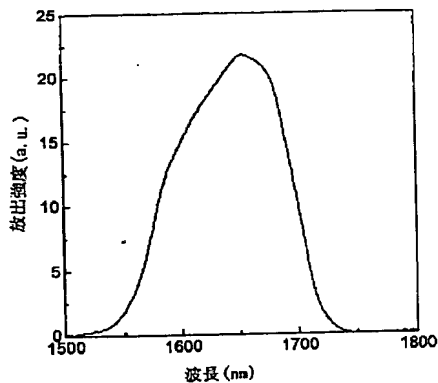
#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態にかかる光増幅器を示した概略図である。

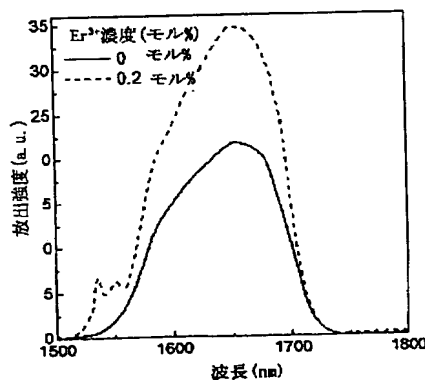
【図1】



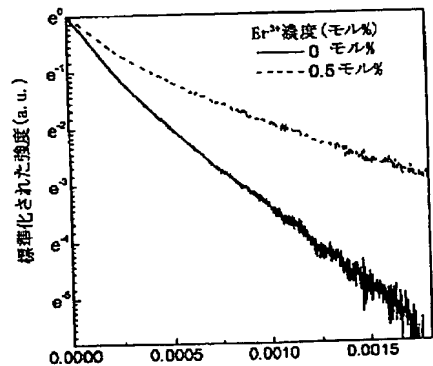
【図4】



【図6】



【図7】



【図2】1モル%のPrイオンが添加されたセレニドガラスの吸収スペクトルを示した図である。

【図3】プラセオジムイオン及びエルビウムイオンのエネルギー準位を示した図である。

【図4】0.05モル%Pr<sup>3+</sup>添加セレニドガラスの蛍光放出スペクトルを示した図である。

【図5】セレニドガラス内のPr<sup>3+</sup>添加濃度に対する(<sup>3</sup>F<sub>3</sub>, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>)準位の蛍光寿命を示した図である。

【図6】0.05モル%Pr<sup>3+</sup>と0.2モル%Er<sup>3+</sup>とが共に添加されたガラスの蛍光放出スペクトルを示した図である。

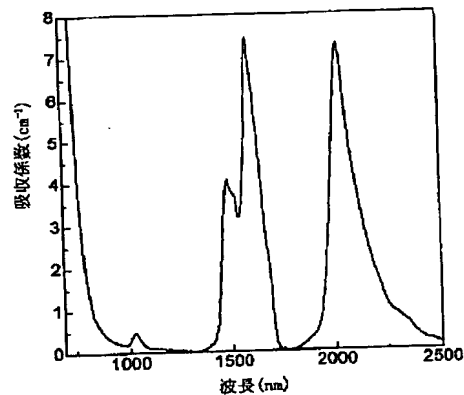
【図7】0.05モル%Pr<sup>3+</sup>単独添加ガラス及び0.05モル%Pr<sup>3+</sup>/0.5モル%Er<sup>3+</sup>が共に添加されたガラスの蛍光減衰曲線を示した図である。

【図8】Er<sup>3+</sup>添加量によるPr<sup>3+</sup>: $1.65\mu\text{m}$  蛍光とEr<sup>3+</sup>: $1.54\mu\text{m}$  蛍光の蛍光寿命を示した図である。

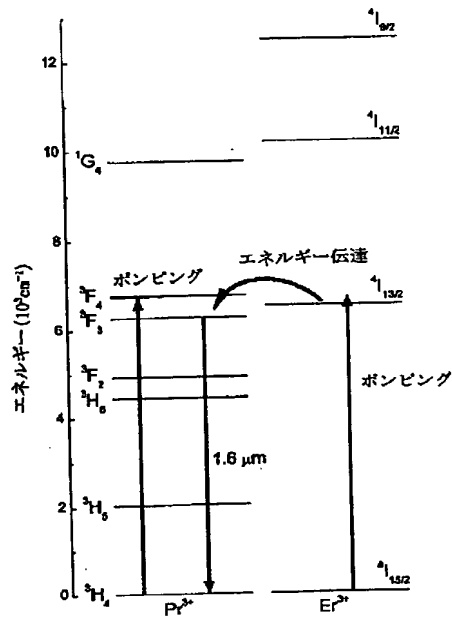
#### 【符号の説明】

- 10 入力光信号
- 20 励起ソース
- 40 増幅された光信号
- 30 低ホノンエネルギーガラス
- 100 光増幅器

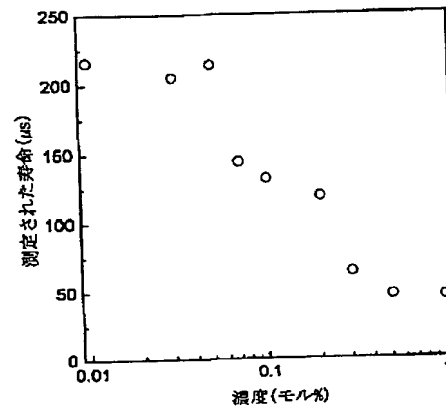
【図2】



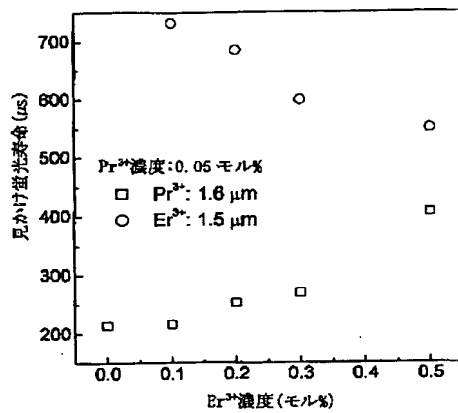
【図3】



【図5】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 キム キョンフオン  
大韓民国 デジョンシ ユシヨング オウ  
ンドン ハンビット アパートメント.  
128-1201

Fターム(参考) 5F072 AB07 AB09 AB20 JJ20 PP07  
PP10